第48卷 第3期
2025年3月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 48 No. 3
Mar. 2025

生态系统服务权衡协同下的甘肃省生态功能分区优化

李潇飞[1]， 龚 健[1,2]， 叶 菁[1,2]， 方鸿嘉[1]， 张世镇[1]， 林家胜[1]

（1. 中国地质大学（武汉）公共管理学院，湖北 武汉 430074； 2. 中国地质大学（武汉）自然资源部法治研究重点实验室，湖北 武汉 430074）

摘 要： 以西北生态脆弱区甘肃省为研究对象，基于自然地理和社会经济数据，运用InVEST模型、CASA模型和ArcGIS空间分析等方法分析甘肃省生态服务功能及其权衡协同关系，探讨权衡协同关系下生态功能分区的优化方案。结果表明：（1）2000—2020年，由于退耕还林等大规模生态建设工程促使甘肃省生态功能较强的林地、草地、河流水面、湖泊水面等地类增加，固碳量、生境质量、土壤保持和产水量4种生态服务均呈现出波动上升趋势。（2）权衡协同关系中，生境质量-产水量、固碳量-产水量、土壤保持-生境质量表现为中等协同关系，土壤保持-固碳量、土壤保持-产水量、生境质量-固碳量表现为强协同关系。（3）利用*K*-means聚类将甘肃省划分为经济-文化发展区、生境质量-固碳优先区、土壤保持-固碳优先区、生物多样-土壤保持区、水土综合保育区和生态服务综合保育区6种生态分区，将权衡协同关系纳入生态系统服务簇分区优化，需优化区占全省面积的3.07%。通过综合分析生态服务相似性和差异性，形成生态系统服务簇后充分考虑其分区内部的权衡协同关系，对传统生态分区进行优化调整，提出增强协同、缓解权衡的空间差异化治理措施。

关 键 词： 生态系统服务；生态分区；权衡协同；甘肃省

文章编号： 1000－6060(2025)03－0467－13(0467～0479)

生态系统服务是自然系统与自然过程形成的对人类有益的自然环境条件与效用，更是群体可持续发展和不断更新的基础[1]，面向生态系统服务的区域优化管控是高质量发展的必然要求。生态系统服务功能是连接社会经济系统和自然生态系统的桥梁，不同服务间往往呈现此消彼长的权衡关系和同增同减的协同关系[2]，而不断增长的人口、对自然系统的高度依赖和城镇化的快速发展加剧了对生态系统的威胁[3]，使得生态服务间持续发展的矛盾日益突出[4]。在人类活动持续加剧情况下，如何采取有效生态治理措施提高区域生态服务供给能力和效能，协调生态服务间的复杂关系是推动国土空间高质量的关键[5]。研究表明，生态系统服务存在时空依赖性，并能够通过生态分区治理实现生态服务权衡间的相互转化[6]。因而基于长序列的生态系统服务权衡协同评估对传统生态分区方案进行调整是决策者应重点关注的课题。

依据生态系统服务功能间的相似性划定生态服务功能分区是进行生态治理的有效方案[7]。近年来，学者利用GIS技术[8]、层次分析法、*K*-means聚类[9]、InVEST模型[10]、情景综合[11]等方式将生态系统服务形成服务簇纳入生态分区，识别结构性质相似的区域簇作为生态功能分区，进而实现生态治理管控。生态系统服务簇在时空上往往表现为一定的共现聚集特征[12]，而生态系统服务捆绑与权衡可以识别多种生态系统服务之间的相互作用，充分表征生态功能间的差异性[13]。目前，研究中往往单独分析生态系统服务簇和生态系统服务权衡协同关系，形成生态系统服务簇后未能充分考虑其分区内部的权衡协同关系，二者关系相互割裂。本研究基于权衡

收稿日期： 2024-05-22； **修订日期：** 2024-08-30
基金项目： 国家自然科学基金项目（41871172）资助
作者简介： 李潇飞（2000-），男，硕士研究生，主要从事土地可持续发展、地理大数据研究. E-mail: xfl20181002806@cug.edu.cn
通讯作者： 叶菁（1977-），女，博士，副教授，主要从事LUCC模拟、三维地质模拟研究. E-mail: yejingcug@cug.edu.cn

协同关系对生态分区进行优化调整，提出增强协同、缓解权衡的空间差异化管控措施，对实现地区生态服务效益最大化具有重要意义，同时将权衡协同纳入生态服务精准分区，综合生态关系后最大限度规避生态服务退化风险，保障生态脆弱区国土空间格局，推动生态系统服务权衡协同研究在国土空间领域的实践应用。

甘肃省处于气候交汇区，区域生态脆弱，土壤结构疏松，高强度的人类建设活动对该区域影响强烈，削弱了区域生态系统维持生态服务功能和提供生态产品的能力。20 a来，不断增长的人口、对自然系统的高度依赖和城镇化的快速发展加剧了对生态脆弱区生态系统的威胁，生态服务供给能力下降，生态效能减弱的问题日益突出。当下，甘肃省以县域尺度的"三屏四区"为生态保护区划分方案，且主要划定依据为生态系统特征、生态问题和气候状况，未充分考虑生态系统服务功能各组分间的权衡协同关系，导致局部生态功能间相互削弱，降低了生态系统服务效能，针对生态系统服务权衡协同构建分区方案尤为关键。

因此，本研究通过2000—2020年连续栅格数据集，评估甘肃省生境质量、固碳量、土壤保持和产水量4种生态系统服务时空特征与权衡关系，利用聚类算法识别生态系统服务簇，并基于生态功能相似性和差异性对分区进行优化调整，针对生态脆弱区现状提出差异化分区治理措施，以提升区域生态效能，维护生态可持续性。

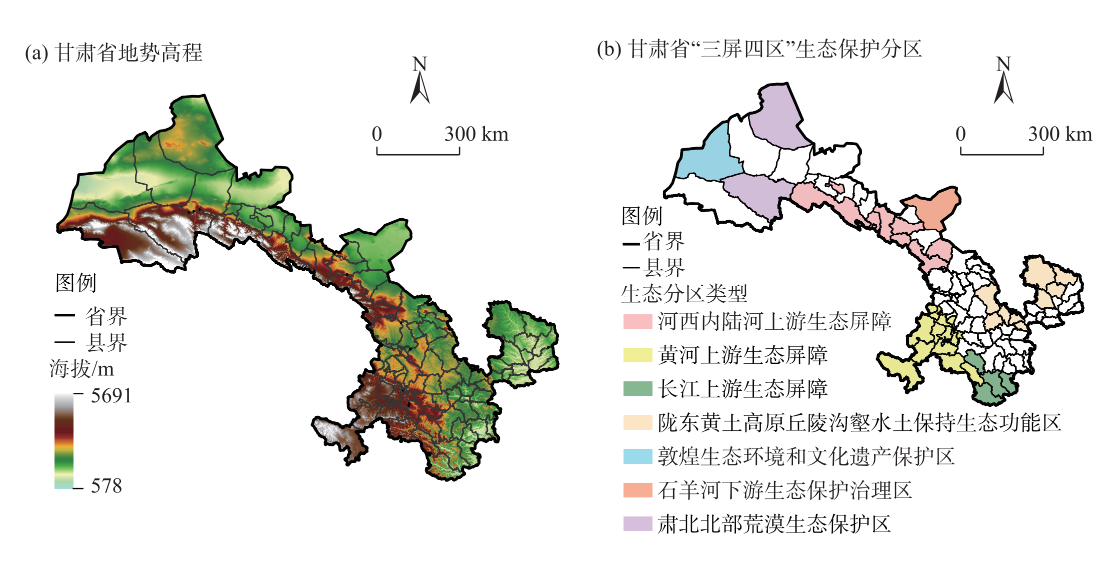
1 数据与方法

1.1 研究区概况

甘肃省位于黄土高原、青藏高原、内蒙古高原三大高原和西北干旱区、青藏高寒区、东部季风区三大自然区域交汇处，生态系统复杂多样[14]。如图1所示，研究区内山地、高原、平川、河谷、沙漠、戈壁类型交错分布，地势自西南向东北倾斜，大致可分为各具特色的陇南山地、陇中黄土高原、甘南高原、河西走廊、祁连山地和河西走廊以北地带六大地形区域。"三屏四区"是甘肃省基于主体功能区确定的生态功能分区，主要包括黄河上游生态屏障、长江上游生态屏障、河西内陆河上游生态屏障、陇东黄土高原丘陵沟壑水土保持生态功能区、石羊河下游生态保护治理区、敦煌生态环境和文化遗产保护区和肃北北部荒漠生态保护区，是甘肃省现行政策下进行生态保护的重点区域。

1.2 数据来源

研究数据包括2000—2020年连续时间序列下的土地利用数据、气象数据、高程数据和社会经济数据及其相关辅助数据。基于研究需要将欧空局土地利用类型转换为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6类。所有空间数据集均采用WGS_1984_UTM_47N坐标系，具体数据来源如表1所示。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2020)4632号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

表1　数据来源及说明

Tab. 1　Data sources and descriptions

数据类型	数据来源	数据尺度/m
土地利用类型	Landcover欧航局（http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/）	1000
土壤数据	世界土壤数据库（HWSD）	1000
高程数据	地理空间数据云（http://www.gscloud.cn/）	1000
气象数据	青藏高原数据科学中心	1000
统计年鉴	国家统计局	-
基础地理数据	国家地理信息中心（http://www.ngcc.cn/ngcc/）	-

1.3　研究方法

1.3.1　研究框架　量化甘肃省2000—2020年生态服务及权衡关系的时空演变特征，对生态服务功能进行分区，针对各功能区主导类型提出差异化的生态系统管控建议，为生态保护和国土空间管理提供科学依据。联合国全球可持续发展目标为全球生态文明实践提供了实践框架（图2），结合甘肃省作为水土流失最为严重的生态脆弱省份和全国“双碳”理念的发展定位，选择与区域密切相关的4类生态系统服务（生境质量、固碳量、土壤保持和产水量），利用InVEST等模型评估甘肃省2000—2020年连续时间序列下的生态系统服务。为降低异常年份对数据干扰，利用逐像元偏相关对生态系统服务权衡关系进行空间制图。在生态功能分区阶段，首先利用*K*-means聚类将具有相似生态服务的区域划分为同一生态服务簇，并基于“三屏四区”生态保护建设区对生态服务簇分区进行定性和定量验证，识别出不同生态系统服务簇中主导生态系统服务功能，同时保证同一服务簇中主导生态功能不出现显著权衡，以此避免生态服务功能发展建设过程中相互排斥的现象，最终形成甘肃省生态功能分区方案并给出协同发展的分区管控建议，以期实现甘肃省可持续发展，为生态脆弱省份提供生态功能分区的样板化方案。

1.3.2　生态系统服务评估　当前主流研究中生境质量、土壤保持、产水量、固碳量和粮食产量5种生态服务是研究重点，而甘肃省作为典型的西北生态脆弱区，粮食产量功能相对薄弱，不是地区发展规划中的重点，而其他4种生态系统服务能充分反映甘肃省20 a间生态工程建设成果，充分表征地区面临的水土流失、荒漠化和气候变化等生态问题，同时考虑到省域文化服务数据获取难度大和抽象性强的特点，因此量化生境质量、固碳量、土壤保持、产水量4种服务能充分反映脆弱区生态重要性和生态脆弱性。

（1）生境质量

生物多样性的保持与生境质量密切相关[15]，研究采用InVEST模型的生物多样性模块来评估生境质量的大小。计算公式如下：

$$HQ_{xj} = H_j\left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z}\right) \tag{1}$$

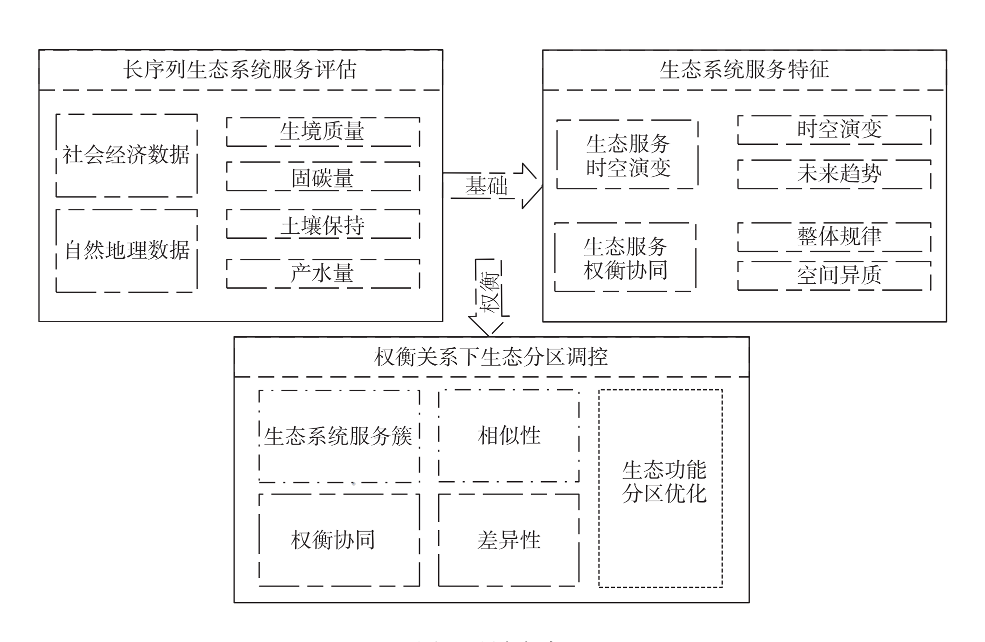


图2　研究框架

Fig. 2　Research framework

式中：HQ_{xj} 为土地利用 j 中栅格 x 的生境质量指数；H_j 为生境类型 j 的生境适宜度，取值范围介于0~1之间；D_{xj}^z 为土地利用 j 中栅格 x 的生境退化度指数；K 为半饱和常数，一般为生境退化度最大值的1/2；z 为归一化常量，通常设置为2.5。

（2）固碳量

植被净初级生产力（NPP）反映固碳量服务功能[16]。采用CASA模型计算NPP，计算公式如下：

$$\mathrm{NPP}(x,t)=\mathrm{APAR}(x,t)\times\varepsilon(x,t) \tag{2}$$

式中：$\mathrm{NPP}(x,t)$ 为像元固碳量（$g\,C\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$）；$\mathrm{APAR}(x,t)$ 为像元 x 在第 t 月的光合有效辐射（$MJ\cdot m^{-2}$）；$\varepsilon(x,t)$ 为第 t 月像元 x 的实际光能利用率（$g\,C\cdot MJ^{-1}$）。

（3）土壤保持

土壤保持量可采用修正土壤流失方程（RUSLE）量化研究区土壤侵蚀量，计算土壤保持功能[17]，计算公式如下：

$$\mathrm{SC}=R\times K\times \mathrm{LS}\times(1-C\times P) \tag{3}$$

式中：SC为土壤保持量（$t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$）；$R$ 为降雨侵蚀力因子（$MJ\cdot mm\cdot hm^{-2}\cdot h^{-1}\cdot a^{-1}$）；$K$ 为土壤侵蚀力因子（$t\cdot hm^{2}\cdot h\cdot hm^{-2}\cdot MJ^{-1}\cdot mm^{-1}$）；LS为坡度坡长因子；$C$ 为植被覆盖因子；P 为土壤保持措施因子。

（4）产水量

产水量表示水源供给量，往往采用InVEST模型产水量模块评估[18]，该模块主要依据水分平衡原理，每个单元降雨量和实际蒸发量的差值即为该栅格的实际供水量，计算公式如下：

$$\mathrm{WY}(x,c)=\left[1-\frac{\mathrm{AET}(x,c)}{P(x)}\right]\times P(x) \tag{4}$$

式中：$\mathrm{WY}(x,c)$ 为土地利用类型 c 下栅格 x 上的产水量(mm)；$\mathrm{AET}(x,c)$ 为土地利用类型 c 下栅格 x 的实际蒸散量(mm)；$P(x)$ 为栅格 x 的年降水量(mm)。

1.3.3 基于Sen趋势和Hurst指数的生态系统服务时序变化分析 由于生态系统服务时序变化是长期持续性的动态过程，需要通过长时间序列下的趋势和稳定性来研究和分析生态系统服务的变化状况。Sen趋势是利用一元线性回归方法识别各生态系统服务功能的变化趋势[19]，计算公式如下：

$$\mathrm{slope}=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}(i\times x_i)-\sum_{i=1}^{n}i\times\sum_{i=1}^{n}x_i}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \tag{5}$$

式中：slope为各研究生态系统服务变量 x 的变化速率；x_i 为第 i 年对应的生态服务功能 x 变量。若slope>0，说明甘肃省生态系统服务功能存在上升趋势，某生态系统服务功能改善提高；反之则说明该生态系统服务存在退化趋势。同时，将slope结果划分为不同的显著区域结果，即显著变化（$P<0.05$）和不显著变化（$P>0.05$）。

基于R/S算法的Hurst指数能定量描述各生态服务功能发展持续性和依赖性状况[20]，往往通过计算时间序列的重叠子序列平均值（R/S）统计量来估计。Hurst指数以0.5为界，小于0.5表明生态服务未来趋势与过去相反，大于0.5则表明与未来发展趋势相同，持续性强。

1.3.4 生态系统服务权衡与协同关系分析 挖掘生态系统服务间此消彼长的相互关系是促进地区可持续发展的关键[21]，决策管理过程需要通过研究权衡协同效应避免因某一生态服务增加而导致的另一生态服务减少，并最终实现“双赢”。利用R语言进行逐像元生境质量、固碳量、土壤保持和产水量的偏相关分析，有效排除第3变量影响从而分析任意2个生态系统服务功能之间的相关程度，其结果可根据相关系数和显著性进行判断（表2）。若结果为显著负相关，表示2种功能在空间上表现为权衡效应；若表现为显著正相关则表现为协同。

表2 相关系数与权衡协同效应的对应关系

Tab. 2 Correspondence between correlation coefficients and trade-offs and synergies effect

相关系数(r)	显著性	权衡协同关系
$r>0$	$P<0.05$	极显著协同
$r>0$	$0.05<P<0.10$	显著协同
$r>0$	$P>0.10$	不显著协同
$r<0$	$P<0.05$	极显著权衡
$r<0$	$0.05<P<0.10$	显著权衡
$r<0$	$P>0.10$	不显著权衡
$r=0$	$P=1.00$	未变化区域

1.3.5 生态功能分区 为提升生态精细化治理水平，本研究利用 K-means 聚类识别栅格像元下生态系统服务簇，由于服务簇数量不同导致生态分区结果存在差异，依据组间平方和最小原则，对比甘肃省“三屏四区”和各生态分区结果，最终确定符合现行分区服务簇的栅格单元生态分区，并结合权衡协

同关系主导规律和现行生态分区政策划定生态系统管理分区方案。

利用ArcGIS软件空间叠加的方式，以服务簇主导功能中避免权衡效应、协同效应出现在同一主导功能服务簇中为原则，整合分区斑块形成生态功能分区。针对各功能区主导类型提出差异化的生态系统管控，研究结果可为其他生态脆弱省份的生态保护和国土空间管理提供重要参考，能提升生态脆弱省份生态效能和科学制定生态管控政策。

2　结果与分析

2.1　生态系统服务功能变化特征

2.1.1　生态系统服务时空演变分析　2000—2020年，甘肃省固碳量、生境质量、土壤保持和产水量均呈现出波动上升趋势（图3），由于退耕还林等大规模生态功能促使甘肃省生态功能较强的林地、草地、河流水面、湖泊水面等地类增加，生态质量持续改善。具体来看，生境质量和固碳量服务时间波动小，在退耕还林政策实施后两者均在2000—2004年快速增长，2004—2014年增速放缓并出现波动，继而又稳定增加；由于土壤保持与产水量服务受到气象数据波动影响，2000—2020年两功能显著波动，呈现出"先增大后减小，再增大减小"的波动式变化趋势。

利用ArcGIS可视化得到2000—2020年4类生态系统服务功能的空间分布（图4）。从图中可见，甘肃省土壤保持空间格局趋于稳定，且以低值区为主，大致呈现为"南高北低"的分布格局；20 a间，土壤保持增加区主要集中于陇南山地和黄河沿线等林草地密度较大的区域，主要由于土壤保持服务依赖于地上附着植被根部对土壤的固定作用，林草地覆盖程度越高对土壤保持越有利。产水量空间分异显著，位于季风区和半湿润区的甘南高原和陇南山地产水量高，而干旱区由于降雨量小且蒸散量大使整体产水量较低。生境质量和固碳量空间格局变化微弱，二者空间均呈现"中南高、东北低"态势，且高值区主要分布于被绵密森林和草地覆盖的长江上游"两江一水"流域、黄河沿线、甘南高原和陇南山地，其中祁连山冰川沿线生境质量较高但固碳量相对较低。

2.1.2　生态系统服务变化趋势分析　各项生态系统服务整体上变化趋势多样，各功能间存在显著性差异（表3）。退耕还林和城市化20 a来，甘肃省生境质量主要呈现减少趋势，反持续显著减少面积占比42.02%，即过去生境质量呈上升趋势，而未来发展中生境质量呈现降低趋势；持续显著减少面积占比25.10%，即该区域过去与未来均呈现出减少趋势；显著增加区域面积占比不足10%。固碳量主要呈

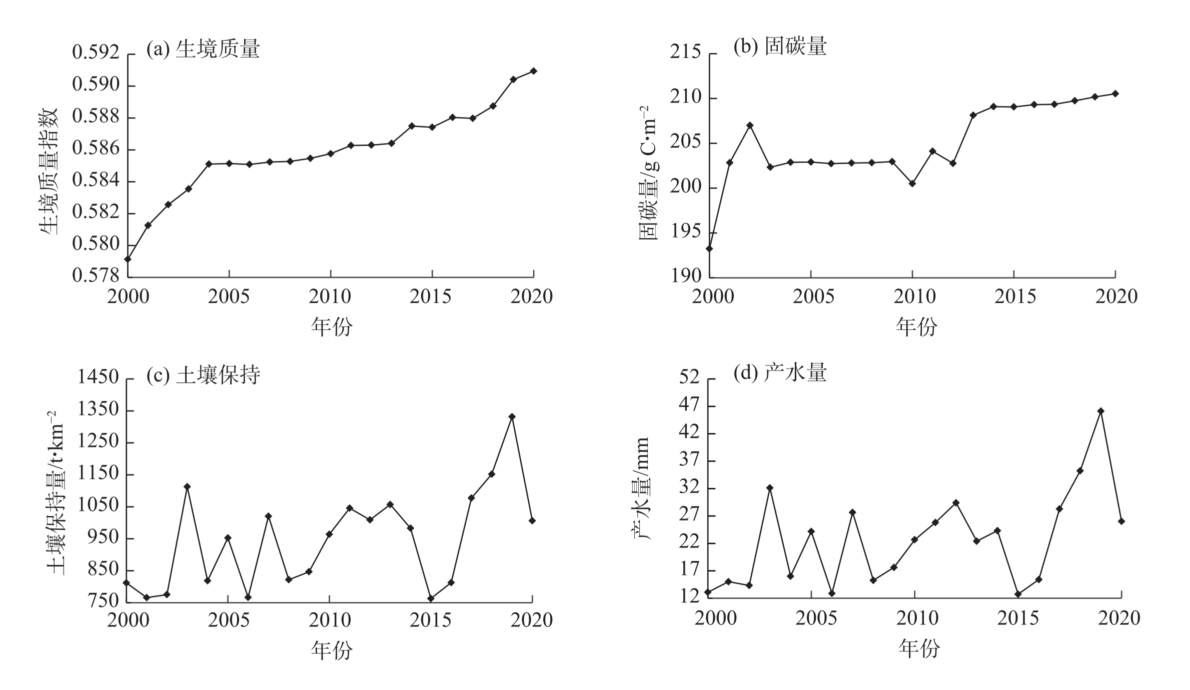


图3　2000—2020年甘肃省生态系统服务时间演变

Fig. 3　Temporal evolution of ecosystem services in Gansu Province from 2000 to 2020

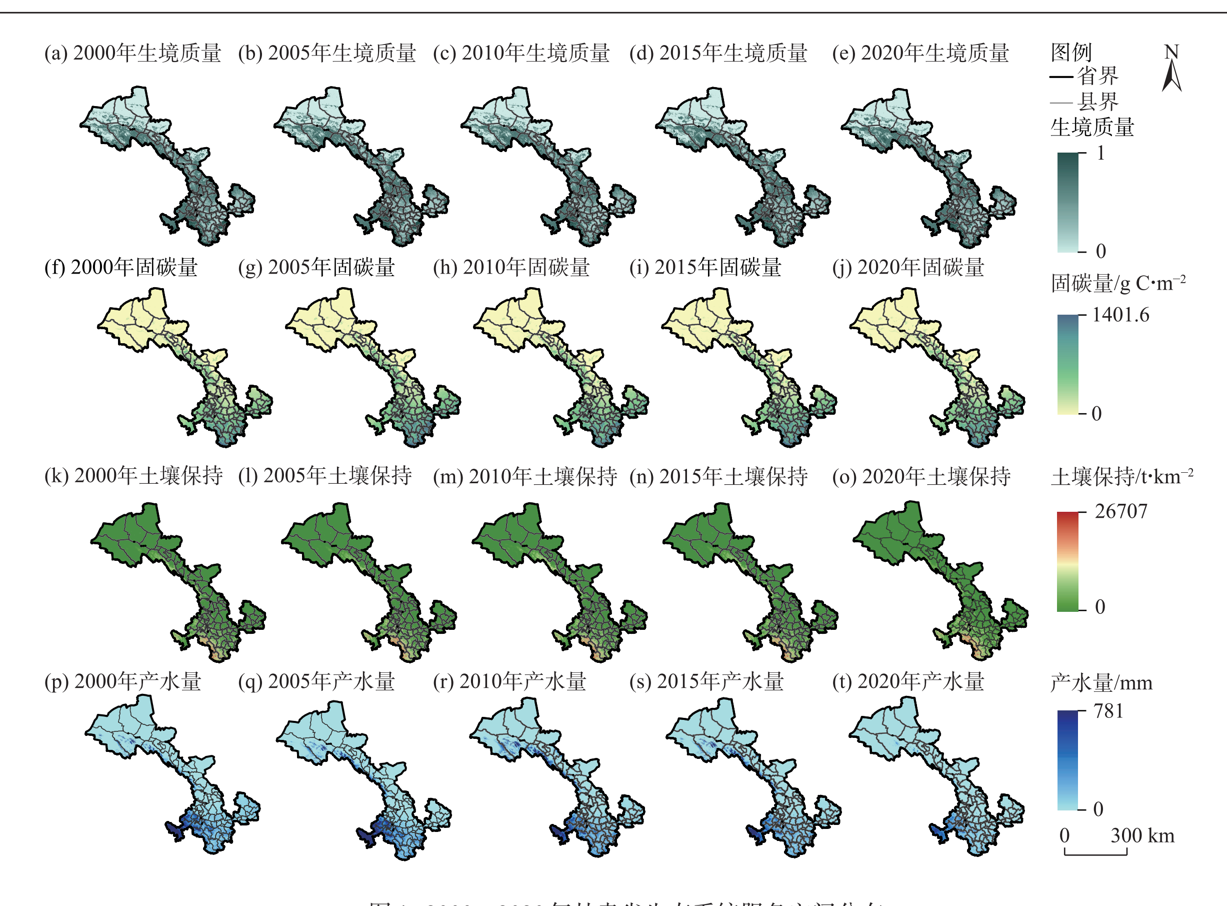


图4 2000—2020年甘肃省生态系统服务空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of ecosystem services in Gansu Province from 2000 to 2020

表3 生态系统服务变化面积占比

Tab. 3 Area proportion of ecosystem service change /%

生态服务类型	反持续显著减少	持续显著减少	反持续显著增加	持续显著增加	反持续未显著变化	持续未显著变化
生境质量	42.02	25.10	0.42	4.25	22.66	5.55
固碳量	0.58	9.05	2.86	26.75	12.12	48.64
土壤保持	0.00	0.19	2.14	33.83	40.34	23.50
产水量	0.17	0.85	5.78	29.81	47.94	15.45

现增加趋势,持续显著增加面积占比26.75%,持续显著减少面积占比9.05%。土壤保持和产水量趋势大致相似,均呈现增加趋势,持续显著增加趋势面积占比均接近30%,而显著减少区域面积占比不足2%。

生态服务变化趋势空间分布中(图5),生境质量在未来减少趋势的类型面积大,以各建设用地为中心呈放射状大片分布,而增加区沿河西走廊零星分布;固碳量未来减少趋势面积小,集中分布于祁连山沿线,未来增加趋势分布广阔,显著增加区位于南部湿润区和黄土高原;土壤保持和产水量未来变化趋势相似,生态服务增加区主要位于河西走廊沿线、甘南高原和陇南山地。

2.2 生态系统服务功能权衡协同关系

从结果上看(表4),2000—2020年生态系统服务间的相关系数均大于0,并通过了0.01的显著性检验,同样表现为显著协同关系。在相关系数强度上,生境质量-产水量、固碳量-产水量、土壤保持-生境质量表现为中等协同关系,土壤保持-固碳量、土壤保持-产水量、生境质量-固碳量表现为强协同关系。

从各服务间的相关系数大小排序上来看,生境质量-固碳量>土壤保持-产水量>土壤保持-固碳量>土壤保持-生境质量>生境质量-产水量>固碳量-产水量。在时间变化趋势上,土壤保持-生境质量、土壤保持-固碳量和生境质量-固碳量在20 a间的协同关系数值较为平稳,变化曲线基本无波动,生境质量-产水量、土壤保持-产水量、固碳量-产水量表现为2000—2005年稳定上升,2005—2020年呈现显著波动。

甘肃省的土壤保持-固碳量表现为强协同关系,这是由于固碳量高值区主要为林地和草地,该土地类型下植被覆盖度更高,根系作用使土壤流失量更少,降雨截留功能增强,增加了土壤保持能力,因而呈现显著的正相关关系。生境质量-固碳量、

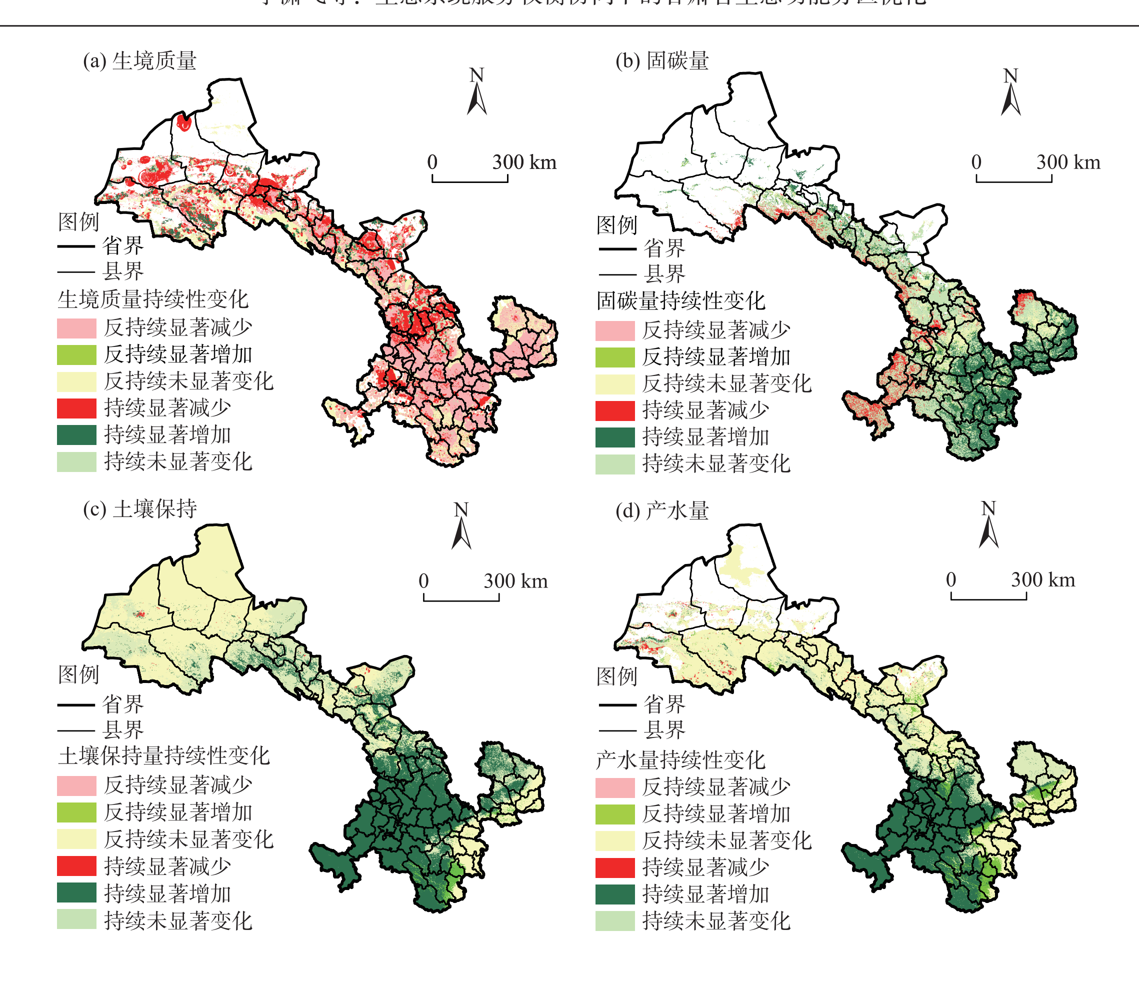


图5　2000—2020年甘肃省生态系统服务变化趋势

Fig. 5　Change trends of ecosystem services in Gansu Province from 2000 to 2020

表4　2000—2020年甘肃省生态系统服务权衡协同关系

Tab. 4　Trade-offs and synergies relationship of ecosystem services in Gansu Province from 2000 to 2020

年份	土壤保持-生境质量	土壤保持-固碳量	土壤保持-产水量	生境质量-固碳量	生境质量-产水量	固碳量-产水量
2000	0.503**	0.580**	0.537**	0.855**	0.399**	0.325**
2005	0.485**	0.564**	0.606**	0.857**	0.412**	0.329**
2010	0.488**	0.567**	0.578**	0.857**	0.389**	0.315**
2015	0.476**	0.569**	0.523**	0.857**	0.334**	0.270**
2020	0.455**	0.547**	0.639**	0.865**	0.406**	0.371**
均值	0.481	0.565	0.577	0.858	0.388	0.322
类型	中等相关	强相关	强相关	强相关	中等相关	中等相关

注:**表示通过P<0.01的显著性检验。

土壤保持-产水量呈现强协同关系,整体上看生境质量高值区集中于甘肃南部的高原山地和祁连山区域的林地,人为干扰因素少,最大限度保留了原有自然景观,林地类型生态系统服务功能高,对应的固碳量和土壤保持更高;甘肃省地处干旱半干旱区,林地分布广泛的区域降雨量丰富,使产水总量增加。土壤保持-产水量均受到土壤质地、降雨量和土地利用等因素的驱动,表现出强协同关系。固碳量-产水量表现为中等相关,主要原因是固碳量受到土地利用类型的影响,而甘肃省气候条件和地形地貌复杂多样,土地利用对产水量的影响相对弱化。

从权衡协同空间分异(图6)和各类型的面积占比上来看,土壤保持-生境质量表现为不显著的权

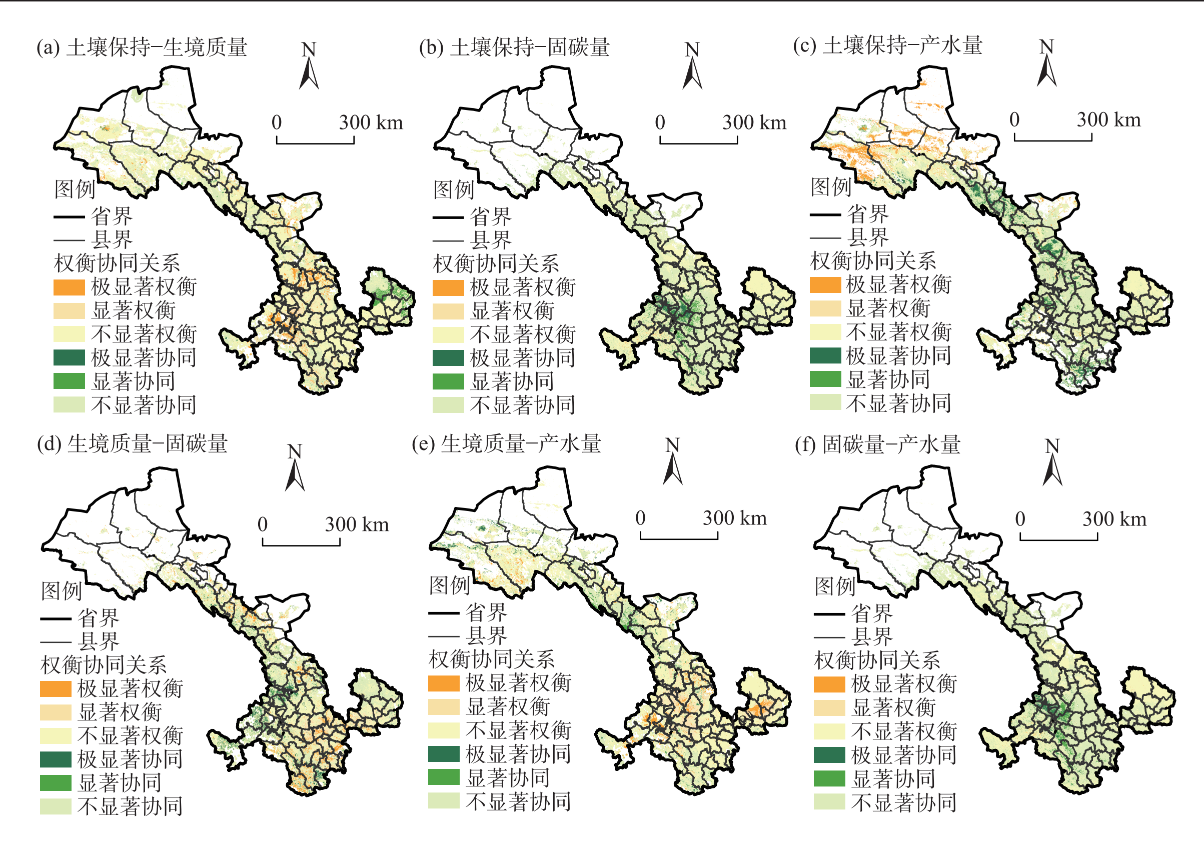


图6 2000—2020年甘肃省生态系统服务权衡协同空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of trade-offs and synergies of ecosystem services in Gansu Province from 2000 to 2020

衡和协同效应,面积占比分别为59.79%和26.03%,显著权衡区域位于甘肃省中部和西南部的乌鞘岭和甘南高原,显著的协同区域主要集中于甘肃省的黄土高原区域,环县、华池县和庆城县集中分布。土壤保持-固碳量主要表现为不显著的权衡和协同效应,面积占比分别为44.09%和26.30%,显著权衡区域主要分布于河西走廊,显著协同区域分布较为零散。土壤保持-产水量主要表现为不显著的权衡和协同,面积占比分别为30.38%和50.80%,显著的权衡和协同区域也呈现明显的聚集效应,显著协同区域主要位于甘肃西南部的陇南山地和中部的河西走廊沿线,显著权衡区域主要位于河西走廊西部。生境质量-固碳量主要表现为极显著的权衡效应和协同效应,面积占比分别为29.6%和63.66%,权衡区域主要位于甘肃省中部河西走廊沿线,协同区域主要位于甘肃西北部,皋兰县、榆中县等县域。生境质量-产水量主要表现为不显著的权衡和协同效应,面积占比分别为57.39%和26.11%,显著权衡协同区域也存在明显聚集区,显著权衡区主要分布于乌鞘岭,显著协同区域主要位于祁连山。固碳量-产水量主要表现为极显著的权衡和协同效应,面积占比分别为38.92%和20.11%,空间分布不均,显著的权衡区域主要位于河西走廊西部,权衡区域主要位于河西走廊沿岸。

2.3 生态系统服务功能分区管控

2.3.1 生态系统服务分区优化 以2020年4种生态系统服务值作为*K*-means聚类训练样本,根据生态系统服务功能相似性对甘肃省全域栅格单元进行生态功能聚类分区,形成生态系统服务簇,通过统计3~10分类数量下的组内平方和,结合甘肃省"四屏三区"生态建设区,经定性和定量化分析,最终确定当服务簇数量为6时,组内平方和达到阈值且与生态建设区有较高重合度。根据每类生态系统服务簇所呈现的4种生态系统服务功能分布特征,识别不同生态系统服务簇的主导生态功能并进行分区命名,以反映不同服务簇主导功能,得到经济-文化发展区、生境质量-固碳优先区、土壤保持-固碳优先区、生物多样-土壤保持区、水土综合保育区和生态服务综合保育区6种分区类型。

利用生态系统权衡协同效应更新服务簇分区,

确保服务簇的主导功能不出现权衡抑制，各服务簇权衡限制如表5所示，其中C1服务簇经济-文化发展区4项生态系统服务功能均不突出，且土地利用类型主要为沙漠戈壁等未利用地，考虑到“一带一路”建设和敦煌沙漠文化发展，该生态类型服务簇不设定权衡效应限制；与之相反，C6服务簇生态服务综合保育区4项生态系统服务功能均表现出较高的生态能力，该生态高质量区域同样未设置限制区。其他服务簇需根据生态服务主导功能权衡进行分区优化，优化前后结果比较如图7所示。其中功能分区中主导功能存在权衡，而其他功能中存在协同关系，则权衡关系可以进行分区优化。

甘肃省生态系统服务分区调整前后对比（图7）所示，在面积变化上，基于生态系统服务权衡需优化区总面积13092 km²，占全省面积的3.07%，该区域主导功能中存在显著权衡关系。其中，生境质量-固碳优先区、土壤保持-固碳优先区、生物多样-土壤保持区和水土综合保育区主导功能中呈显著权衡关系面积分别为6466 km²、155 km²、5686 km²和785 km²。结合权衡和协同关系对权衡区域进行分区优化，按照“就近-协同”原则纳入至其他主导功能生态分区中进行决策管理。

2.3.2　生态系统服务分区管控路径　生态服务分区管控应在体现分区主导功能的同时，结合甘肃省生态脆弱省份的发展现实，通过功能分区发挥不同区域资源优势，最终实现生态脆弱区生态质量整体提升与协调共赢。

经济-文化发展区生态系统服务功能均较低，且地处干旱半干旱沙漠地区，降雨稀少，主要为戈壁、沙漠等未利用地，土地不适应开发利用，区域生态环境十分脆弱。一方面，对于该区域要实施全面节水，利用重大生态调水工程来调整水资源利用结构，减少资源的无序开发，挖掘敦煌文化传承潜力。另一方面，该区域作为国家生态屏障，需持续推进植树造林，增加植被覆盖率，减少土地荒漠化，实现生态修复和经济高质量发展。

生境质量-固碳优先区主导功能为生境质量和固碳量，地处河西走廊沿线和陇中地区。该区域以

表5　生态系统服务簇主导功能及权衡效应限制

Tab. 5　Dominant functions and trade-off effect restrictions of ecosystem service clusters

服务簇	生境质量	土壤保持/t·km⁻²	产水量/mm	固碳量/g C·m⁻²	主导功能	分区类型	权衡关系限制
C1	0.30	29.78	1.94	11.7	文化功能	经济-文化发展区	无
C2	0.82	251.59	3.10	107.9	生境质量、固碳量	生境质量-固碳优先区	生境质量-固碳量
C3	0.40	1043.43	15.44	457.7	土壤保持、固碳量	土壤保持-固碳优先区	土壤保持-固碳量
C4	0.92	2319.67	55.65	593.2	土壤保持、生境质量、固碳量	生物多样-土壤保持区	土壤保持-生境质量
C5	0.75	2616.19	204.68	324.8	产水量、土壤保持	水土综合保育区	土壤保持-产水量
C6	0.86	10481.80	98.08	637.9	土壤保持、生境质量、固碳量、产水量	生态服务综合保育区	无

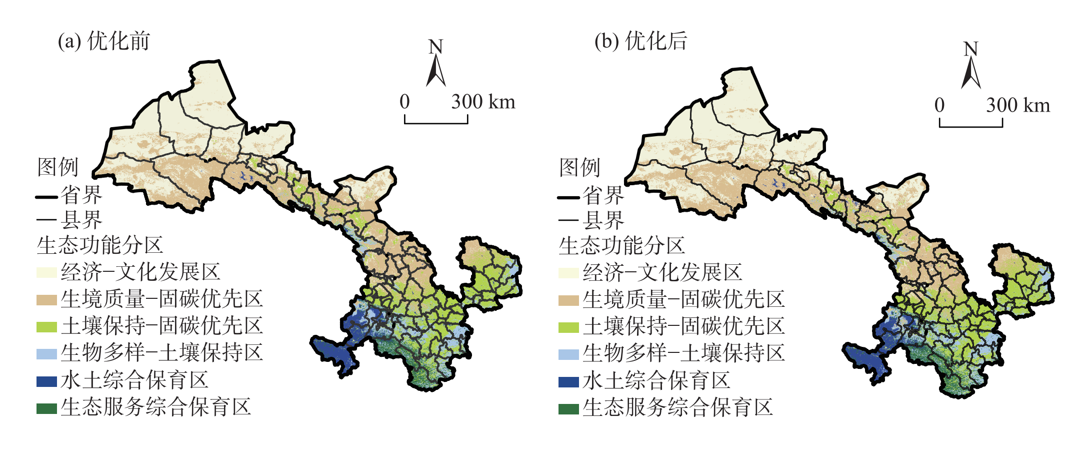


图7　生态功能分区优化前后对比

Fig. 7　Comparison of ecological function zoning before and after optimization

省会兰州为中心，辐射周边地区，该生态分区下应当注重生态与经济发展平衡，在建设用地开发建设过程中避免破坏林草地等生物栖息地，推动生物多样性建设。同时，河西走廊中部呈现出部分主导功能权衡区，在发展过程中应兼顾二者关系，平衡发展瓶颈。

土壤保持-固碳优先区主导功能为土壤保持和固碳量，地处甘肃省中部和祁连山附近。该区域的生态质量逐渐降低，黄土高原区水土流失加剧，需对该区域进行抢救性保护，防止人为破坏。同时，实行严格的生态管制措施，对该区域土壤保持功能进行及时恢复和精准修复。

生物多样-土壤保持区主导功能为固碳量、生境质量和土壤保持，其空间分布较为零散。为减少区域土地破碎化，增加植被覆盖率，需要推进植树造林，依托地域内国家级生态治理区实现生态修复和经济高质量发展，持续加强地区生态保护和修复力度、筑牢国家西部生态安全屏障。

水土综合保育区主导功能为产水量和土壤保持，主要位于甘肃省西南部、青藏高原东北边缘。该区域林草地集中，传统牧业比较发达，具有重要的生态功能。为持续提高该区域生态能力，在未来发展过程中要坚持生态优先，注重保护和发展并进的方针政策，打造黄河上游生态屏障，持续推进退耕政策，加大生态修复和环境保护力度，增强水土保持能力。

生态服务综合保育区的主导功能为产水量、土壤保持、固碳量和生境质量，地处甘肃省东南部。该区域林地面积广阔、气候湿润、植被覆盖度高，是甘肃省退耕还林还草重大生态工程建设区域。在未来的发展中，应当坚持最严格的生态保护制，持续推进国家重大生态治理工程，加强对生态的保护。

3 讨论

在生态服务时空特征方面，退耕还林等大规模生态工程在一定程度上促使甘肃省生态功能较强的林地、草地等地类增加，生态质量持续改善，与徐省超等[22]研究呈现一致性。其中，固碳量和生境质量在退耕还林政策实施后迅速提升，但随后增速放缓并出现波动，反映出生态工程初期效应显著，但长期效果可能受到其他因素影响，如气候变化和土地利用变迁；土壤保持和产水量受降水、蒸发量等气候波动影响较大，呈现出“先增大后减小，再增大减小”的波动式变化趋势，表明气候变化对土壤保持和产水量的影响较为显著，需要进一步长期监测与研究。同时，生态脆弱区文化服务难以忽略，但由于文化服务在栅格层面尚未形成统一的量化概念，研究未对文化服务进行栅格量化，而是通过政策解读划定沙漠区为文化服务重点区，该过程需要更详细的理论支持。与其他研究相比，本研究通过长序列数据分析能全面反映生态服务的动态变化过程，然而研究数据时间跨度为2000—2020年，部分年份数据可能受异常气候事件或人为活动影响，导致数据波动等不确定问题，下一步利用更长时序的数据综合生态、文化和社会多维度从不同视角量化地区生态功能状况。

生态服务权衡协同关系方面，生态服务间权衡关系是复杂动态过程，研究区多种生态系统服务整体呈现协同关系，与相关研究也呈现较高一致性[23]，干旱区中此类生态服务整体呈现协同关系，未融入供给服务类型对权衡协同结果也存在影响。同时，本研究通过长序列数据的逐像元分析揭示出权衡协同规律，结果反映出甘肃省生态服务权衡协同关系在空间上分异规律显著，权衡关系受研究尺度和地域情景等多种因素影响[24]，研究中利用生态系统服务权衡关系表征生态系统服务内部的矛盾性和互斥性，下一步还需以海量大数据等多尺度数据挖掘更精准的权衡协同关系，提升精细化治理水平，为生态脆弱区生态功能保护提供更为详细的决策参考。

生态功能分区优化方面，实现“高协同”甚至“全协同”效益最大化是生态系统管理的最终目标，而实际情况与最终目标间往往存在差异，多数区域中生态功能或多或少存在一种以上的“权衡”关系，阻碍生态效益最大化的实现。而通过人为干预管控，精准将权衡区转化为另一功能协同区，能充分保障地域主导生态功能发展[25]，相关研究[26]直接依据*K*-means聚类识别生态功能相似性划分主导功能区，忽略了分区内部的权衡关系，生态系统服务簇反映出生态服务间的相似性和共现性，而权衡协同关系表现为内部作用的差异性，将权衡协同应用到生态分区治理中，识别生态分区中的权衡区域并分

区管控优化,能有效预防未来发生的生态退化风险,对于生态脆弱省份的国土空间格局稳定性具有显著作用效果。下一步可通过评估生态分区优化前后对决策者和利益相关方的影响差异,能更为充分地将分区决策应用于实践框架中。

4 结 论

(1) 2000—2020年,甘肃省固碳量、生境质量、土壤保持和产水量4种生态服务均呈现出波动上升趋势,生态质量持续改善。

(2) 以权衡关系反映生态功能差异性,在整体权衡协同关系中,生境质量-产水量、固碳量-产水量、土壤保持-生境质量表现为中等协同关系,土壤保持-固碳量、土壤保持-产水量、生境质量-固碳量表现为强协同关系,权衡协同空间分异明显。

(3) 以生态系统服务簇反映生态功能共现性,甘肃省可划分经济-文化发展区、生境质量-固碳优先区、土壤保持-固碳优先区、生物多样-土壤保持区、水土综合保育区和生态服务综合保育区6种生态系统服务簇。

(4) 综合考量生态服务功能共现性和差异性,生态系统服务权衡需优化区占甘肃省面积的3.07%,生境质量-固碳优先区、土壤保持-固碳优先区、生物多样-土壤保持区和水土综合保育区主导功能中呈现显著权衡关系面积分别为6466 km^2、155 km^2、5686 km^2和785 km^2。

参考文献(References)

[1] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 19-25. [Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, Miao Hong. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(5): 19-25.]

[2] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 等. 生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望[J]. 地球科学进展, 2015, 30(11): 1250-1259. [Dai Erfu, Wang Xiaoli, Zhu Jianjia, et al. Progress and perspective on ecosystem services trade-offs[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(11): 1250-1259.]

[3] 苏伯儒, 刘某承. 基于生态系统服务权衡的生态系统管理策略研究进展[J]. 自然资源学报, 2023, 38(7): 1848-1862. [Su Boru, Liu Moucheng. Research progress in ecosystem management strategies based on ecosystem services trade-offs[J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(7): 1848-1862.]

[4] Huang Y T, Wu J Y. Spatial and temporal driving mechanisms of ecosystem service trade-off/synergy in national key urban agglomerations: A case study of the Yangtze River Delta urban agglomeration in China[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110800, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110800.

[5] Li S, Zhu C M, Deng X D. Exploring the urban-rural gradient effects of construction land expansion processes on land use function trade-off/synergy in rapidly urbanizing areas[J]. Land Degradation & Development, 2024, 35(1): 46-61.

[6] 刘颂, 张浩鹏, 裴新生, 等. 长时间序列生态系统服务权衡与协同驱动因素——以芜湖市生态系统服务功能极重要区为例[J]. 生态学报, 2024, 44(5): 1780-1790. [Liu Song, Zhang Haopeng, Pei Xinsheng, et al. Drivers of ecosystem service trade-off and synergy in long-term sequence: A case study of the extremely important ecosystem service function area in Wuhu City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 1780-1790.]

[7] 赵筱青, 石小倩, 李驭豪, 等. 滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区[J]. 地理学报, 2022, 77(3): 736-756. [Zhao Xiaoqing, Shi Xiaoqian, Li Yuhao, et al. Spatio-temporal pattern and functional zoning of ecosystem services in the karst mountainous areas of southeastern Yunnan[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(3): 736-756.]

[8] Li J L, Hu D W, Wang Y Z, et al. Study of identification and simulation of ecological zoning through integration of landscape ecological risk and ecosystem service value[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 107: 105442, doi: 10.1016/j.scs.2024.105442.

[9] 袁海威, 龚建周, 陈雅婷, 等. 基于地域区划的广东省陆域生态系统服务簇与模式识别[J]. 生态学报, 2023, 43(22): 9384-9401. [Yuan Haiwei, Gong Jianzhou, Chen Yating, et al. Recognition and analysis of ecosystem service cluster patterns in Guangdong Province based on region division[J]. Acta Ecological Sincia, 2023, 43(22): 9384-9401.]

[10] Xu J Y, Chen J X, Liu Y X. Partitioned responses of ecosystem services and their tradeoffs to human activities in the Belt and Road region[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 123205, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123205.

[11] Peng H J, Zhang X S, Ren W, et al. Spatial pattern and driving factors of cropland ecosystem services in a major grain-producing region: A production-living-ecology perspective[J]. Ecological Indicators, 2023, 155: 111024, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.111024.

[12] 申嘉澍, 梁泽, 刘来保, 等. 雄安新区生态系统服务簇权衡与协同[J]. 地理研究, 2020, 39(1): 79-91. [Shen Jiashu, Liang Ze, Liu Laibao, et al. Trade-offs and synergies of ecosystem service bundles in Xiong'an New Area[J]. Geographical Research, 2020, 39(1): 79-91.]

[13] Mo W B, Zhao Y L, Yang N, et al. Ecological function zoning based on ecosystem service bundles and trade-offs: A study of Dongjiang Lake Basin, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(14): 40388-40404.

[14] 潘冬荣, 闫浩文, 韩天虎, 等. 基于当量因子法的甘肃省草原生态系统服务价值评估[J]. 草业科学, 2021, 38(9): 1860-1868. [Pan Dongrong, Yan Haowen, Han Tianhu, et al. Evaluation of the service function value of grassland ecosystems in Gansu Province using the equivalence factor method[J]. Pratacultural Science, 2021, 38(9): 1860-1868.]

[15] 袁宏伟, 蔡俊, 章磊. 国家重点生态功能区人类活动与生境质量时空变化特征及空间效应[J]. 干旱区地理, 2023, 46(6): 934-948. [Yuan Hongwei, Cai Jun, Zhang Lei. Temporal and spatial changes of human activities and habitat quality in national key ecological function areas and their spatial effects[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(6): 934-948.]

[16] Wang Z L, Dong C, Dai L D, et al. Spatiotemporal evolution and attribution analysis of grassland NPP in the Yellow River source region, China[J]. Ecological Informatics, 2023, 76: 102135, doi: 10.1016/j.ecoinf.2023.102135.

[17] Pranav D S, Anna K, Paweł H, et al. Possibility of spatial estimation of soil erosion using revised universal soil loss equation model and generalized additive model in post-hard coal mining spoil heap [J]. Land Degradation & Development, 2023, 35(3): 923-935.

[18] Wang C, Li K M, Yuan C X. Study of the effects of land use change on water yield in the Qilian Mountains in western China[J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111464, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.111464.

[19] Lal M, Ismail M, Jatisankar B, et al. Assessment of spatio-temporal trends of satellite-based aerosol optical depth using Mann-Kendall test and Sen's slope estimator model[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2022, 13(1): 1270-1298.

[20] 孙国军, 李卫红, 朱成刚, 等. 2000—2015年伊犁河谷植被覆盖时空变化特征[J].干旱区地理, 2020, 43(6): 1551-1558. [Sun Guojun, Li Weihong, Zhu Chenggang, et al. Spatial-temporal characteristics of vegetation cover in Ili River Valley from 2000 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1551-1558.]

[21] 张春悦, 白永平, 杨雪荻, 等. 多情景模拟下宁夏平原生态系统服务簇识别研究[J]. 地理研究, 2022, 41(12): 3364-3382. [Zhang Chunyue, Bai Yongpin, Yang Xuedi, et al. Identification of ecosystem service bundles in Ningxia Plain under multi-scenario simulation[J]. Geographical Research, 2022, 41(12): 3364-3382.]

[22] 徐省超, 赵雪雁, 宋晓谕. 退耕还林(草)工程对渭河流域生态系统服务的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3893-3904. [Xu Xingchao, Zhao Xueyan, Song Xiaoyu. Impacts of the returning farmland to forest (grassland) project on ecosystem services in the Weihe River Basin, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 3893-3904.]

[23] Li Y G, Liu W, Feng Q, et al. Quantitative assessment for the spatiotemporal changes of ecosystem services, tradeoff-synergy relationships and drivers in the semi-arid regions of China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(1): 239, doi: 10.3390/rs14010239.

[24] 邓钰栎, 王丹, 许涵. 双尺度下广东韶关市生态系统服务及其权衡/协同关系及社会生态驱动因素[J]. 应用生态学报, 2023, 34(11): 3073-3084. [Deng Yuli, Wang Dan, Xu Han. Trade-offs and synergies relationships of ecosystem services and their socio-ecological driving factors under different spatial scales in Shaoguan City, Guangdong, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(11): 3073-3084.]

[25] 李倩茹, 贾彦龙, 王慧军, 等. 基于生态功能区的河北省生态系统服务权衡与协同分析[J]. 地理学报, 2023, 78(11): 2833-2849. [Li Qianru, Jia Yanlong, Wang Huijun, et al. Analysis of trade-off and synergy effects of ecosystem services in Hebei Province from the perspective of ecological function area[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(11): 2833-2849.]

[26] 王彬宇, 王玲, 陈俊辰, 等. 四湖流域生态功能分区及其影响因素识别[J]. 应用生态学报, 2023, 34(10): 2757-2766. [Wang Binyu, Wang Ling, Chen Junchen, et al. Identification of ecological functional zoning and its influencing factors in the Sihu Lake Basin, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(10): 2757-2766.]

Optimization of ecological function zoning in Gansu Province under the trade-offs and synergies of ecosystem services

LI Xiaofei[1], GONG Jian[1,2], YE Jing[1,2], FANG Hongjia[1],
ZHANG Shizhen[1], LIN Jiasheng[1]
(1. School of Public Administration, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 2. Key Laboratory of Rule of Law Research, Ministry of Natural Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Using physical geographic and socioeconomic data, we analyzed the ecological service functions and their trade-off synergistic relationship in Gansu Province, which is an ecologically fragile area in northwest China. We explored the optimization of ecological function zoning under a trade-off synergistic relationship by applying the InVEST model, CASA model, and ArcGIS spatial analysis. The results were as follows: (1) From 2000 to 2020, because of large-scale ecological construction projects, such as the return of farmland to forests, the ecological functions of Gansu Province (e.g., forest land, grassland, river water surface, and lake water surface) increased, and four kinds of ecological services (i.e., carbon sequestration, habitat quality, soil retention, and water production) showed fluctuating upward trends. (2) In the trade-off synergistic relationship, the habitat quality-water production, carbon sequestration-water production, soil retention-habitat quality, and carbon sequestration-water production showed medium to high levels of ecological services. Habitat quality-soil conservation showed moderate synergistic relationships, whereas soil conservation-carbon sequestration, soil conservation-water yield, and habitat quality-carbon sequestration showed strong synergistic relationships. (3) On the basis of *K*-means clustering, Gansu Province was divided into six ecological zones: economic-cultural development zone, habitat quality-carbon sequestration priority zone, soil conservation-carbon sequestration priority zone, biodiversity-soil conservation zone, soil and water conservation zone, and ecological services conservation zone. The trade-off synergistic relationships were incorporated in the optimization of ecosystem service cluster zoning, and the area to be optimized accounted for 3.07% of the province's area. By comprehensively analyzing the similarities and differences of ecosystem services and forming ecosystem service clusters with full consideration of the trade-off synergistic relationship within zones, the traditional ecological zoning was optimized and adjusted, and spatially differentiated governance measures were proposed to enhance synergies and mitigate trade-offs.

Key words: ecosystem services; ecological zoning; trade-offs and synergies; Gansu Province